



Università degli  
Studi di Pavia

# Laboratorio di Elettronica II

## Esperienza 1

*Misura delle NON idealità dell'Op-Amp  
UA741*



Università degli  
Studi di Pavia

# Attività

---

Misura delle principali non idealità di un Op-Amp commerciale

Parte I: non-idealità statiche:

- tensione di offset all'ingresso
- correnti di polarizzazione
- corrente di offset

Parte II: non-idealità dinamiche:

- slew-rate
- prodotto banda-guadagno

Confronto dei risultati sperimentali con quanto riportato nel datasheet



Università degli  
Studi di Pavia

# *Obiettivi di Apprendimento*

---

- Ripasso della strumentazione disponibile sui banchi:
  - alimentatore
  - multimetro digitale
  - generatore di funzioni
  - oscilloscopio digitale
- Riconoscere i componenti (Resistori, Op-Amp)
- Montare semplici prototipi su Breadboard
- Ripassare le fondamentali non-idealità dell'Op-Amp

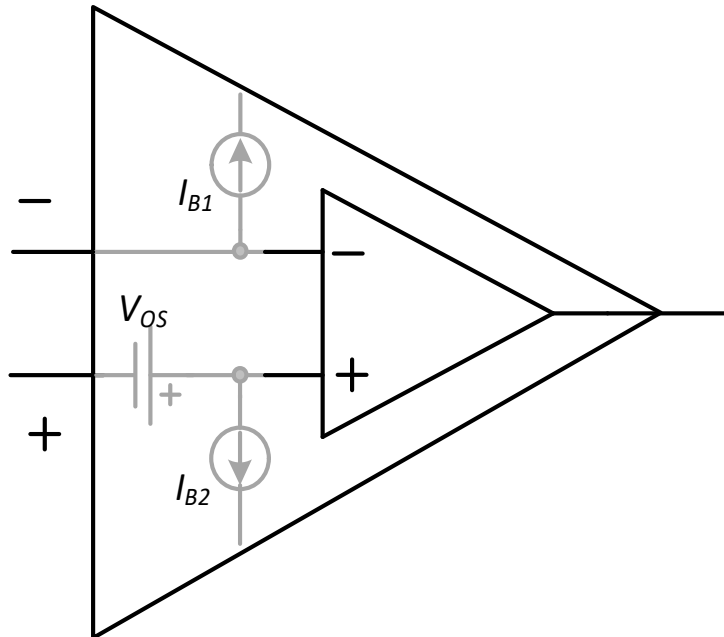


## *Intervento Silvia Roncelli:*

- *Organizzazione del Laboratorio... Armadi, cavetteria e materiale presente nei n.2 cassetti dei banchi*
- *Spiegazione della strumentazione (alimentatore e multimetro)*
- *Breadboard (bianca , azzurra)*
- *Spiegazione dei Resistori (codice colori, serie E12)*
- *Op-Amp UA741 (package e piedinatura)*



# Correnti di polarizzazione e tensione di Offset



- **$V_{os}$**

Rappresenta la tensione differenziale di ingresso che annulla la tensione di uscita:

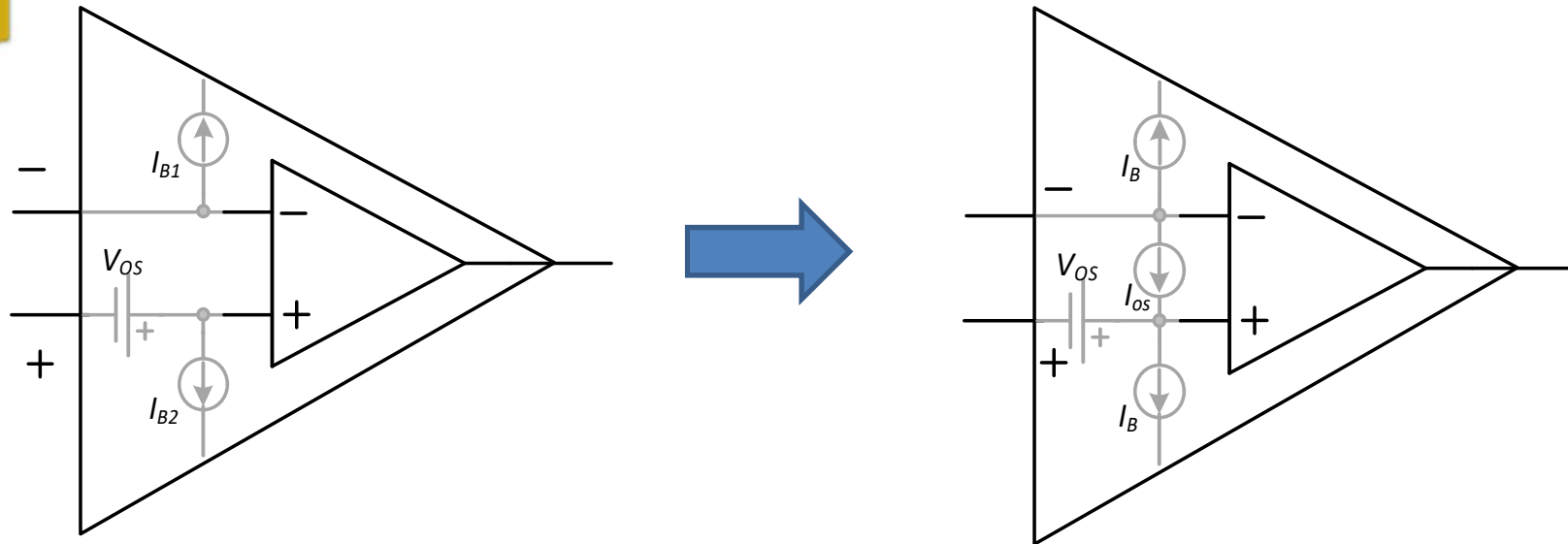
$$V_o = 0V \quad \text{se } V_{in} = (V_+ - V_-) = -V_{os}$$

- **$I_{B1}, I_{B2}$**

L'amplificatore operazionale richiede (piccole) correnti per la polarizzazione dei transistor dello stadio di ingresso.  $I_{B1}, I_{B2}$  scorrono attraverso i componenti collegati esternamente



# Corrente di Offset



In pratica,  $I_{B1}$ ,  $I_{B2}$  differiscono leggermente. Una rappresentazione alternativa consiste nell'assumerle identiche ed aggiungere un generatore di corrente di offset ( $I_{OS}$ ), che modella la reale differenza. Dall'equivalenza degli schemi mostrati, si ottiene:

$$I_{B1} = I_B - I_{OS}$$

$$I_{B2} = I_B + I_{OS}$$



$$I_{OS} = \frac{I_{B2} - I_{B1}}{2}$$

$$I_B = \frac{I_{B2} + I_{B1}}{2}$$



# Amplificatori Operazionali commerciali

Parametro	Ideale	Ingresso a BJT			Ingresso a FET	
		741C	LM301A	LMH6703	TL081/LF351	CA3140
$R_i$	$\infty$	2 M $\Omega$	800 k $\Omega$	1 M $\Omega$	10 <sup>12</sup> $\Omega$	1,5 · 10 <sup>12</sup> $\Omega$
$V_{os}$	0	2 mV	1 mV	7 mV	5 mV	2 mV
$I_{bias}$	0	80 nA	120 nA	7 $\mu$ A	50 pA	10 pA
$I_{os}$	0	20 nA	40 nA	0,5 nA	25 pA	0,5 pA
$V_{in}$	+ $V_{CC}$ - $V_{EE}$	$\pm$ 14 V	$\pm$ 14 V	$\pm$ 3,4 V	$\pm$ 14 V	+13 V -14,4 V
$R_o$	0	75 $\Omega$	-	0,05 $\Omega$	75 $\Omega$	60 $\Omega$
$V_{out}$	+ $V_{CC}$ - $V_{EE}$	$\pm$ 14 V	$\pm$ 14 V	$\pm$ 3,4 V	$\pm$ 13,5 V	+13 V -14,4 V
$I_{sc}$	-	25 mA	-	90 mA	25 mA source 17 mA sink	40 mA source 18 mA sink
$A_{OL}$	$\infty$	2 · 10 <sup>5</sup>	1,6 · 10 <sup>5</sup>	1 ÷ 10	1 · 10 <sup>5</sup>	1 · 10 <sup>5</sup>
SR	$\infty$	0,5 V/ $\mu$ s	0,5 V/ $\mu$ s	4200 V/ $\mu$ s	13 V/ $\mu$ s	7 V/ $\mu$ s
GBP = $f_T$	$\infty$	1 MHz	1 MHz	1,2 GHz	4 MHz	1 MHz
CMRR	$\infty$	90 dB	90 dB	47 dB	100 dB	90 dB



# UA 741



## UA741

### GENERAL PURPOSE SINGLE OPERATIONAL AMPLIFIER

- LARGE INPUT VOLTAGE RANGE
- NO LATCH-UP
- HIGH GAIN
- SHORT-CIRCUIT PROTECTION
- NO FREQUENCY COMPENSATION REQUIRED
- SAME PIN CONFIGURATION AS THE UA709

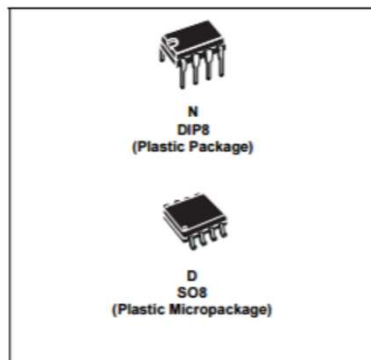
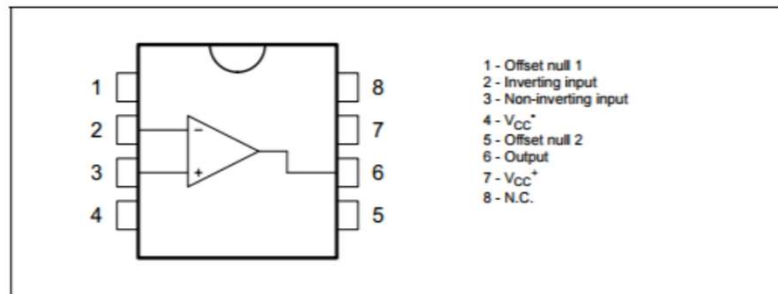
#### DESCRIPTION

The UA741 is a high performance monolithic operational amplifier constructed on a single silicon chip. It is intended for a wide range of analog applications.

- Summing amplifier
- Voltage follower
- Integrator
- Active filter
- Function generator

The high gain and wide range of operating voltages provide superior performances in integrator, summing amplifier and general feedback applications. The internal compensation network (6dB/octave) insures stability in closed loop circuits.

#### PIN CONNECTIONS (top view)



#### ORDER CODE

Part Number	Temperature Range	Package	
		N	D
UA741C	0°C, +70°C	•	•
UA741I	-40°C, +105°C	•	•
UA741M	-55°C, +125°C	•	•

Example : UA741CN

N = Dual In Line Package (DIP)  
 D = Small Outline Package (SO) - also available in Tape & Reel (DT)

#### ELECTRICAL CHARACTERISTICS

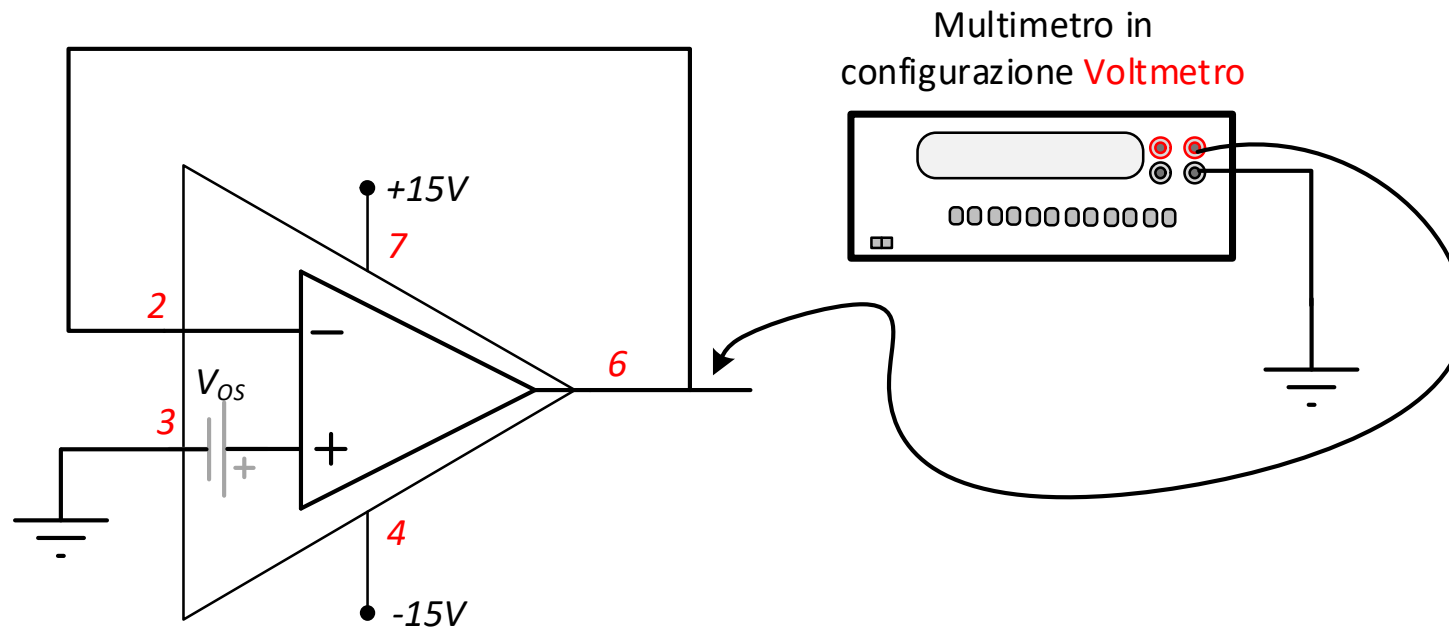
$V_{CC} = \pm 15V$ ,  $T_{amb} = +25^\circ C$  (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_{io}$	Input Offset Voltage ( $R_s \leq 10k\Omega$ ) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1	5 6	mV
$I_{io}$	Input Offset Current $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		2	30 70	nA
$I_{ib}$	Input Bias Current $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		10	100 200	nA
$A_{vd}$	Large Signal Voltage Gain ( $V_o = \pm 10V$ , $R_L = 2k\Omega$ ) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	50 25	200		V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio ( $R_s \leq 10k\Omega$ ) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	77 77	90		dB
$I_{CC}$	Supply Current, no load $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1.7	2.8 3.3	mA
$V_{icm}$	Input Common Mode Voltage Range $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	$\pm 12$ $\pm 12$			V
CMR	Common Mode Rejection Ratio ( $R_s \leq 10k\Omega$ ) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	70 70	90		dB
$I_{OS}$	Output short Circuit Current	10	25	40	mA
$\pm V_{opp}$	Output Voltage Swing $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	$R_L = 10k\Omega$ 12 $R_L = 2k\Omega$ 10 $R_L = 10k\Omega$ 12 $R_L = 2k\Omega$ 10	14 13		V
SR	Slew Rate $V_i = \pm 10V$ , $R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$ , unity Gain	0.25	0.5		V/ $\mu s$
$t_r$	Rise Time $V_i = \pm 20mV$ , $R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$ , unity Gain		0.3		$\mu s$
$K_{ov}$	Overshoot $V_i = 20mV$ , $R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$ , unity Gain		5		%
$R_i$	Input Resistance	0.3	2		M $\Omega$
GBP	Gain Bandwidth Product $V_i = 10mV$ , $R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$ , $f = 100kHz$	0.7	1		MHz
THD	Total Harmonic Distortion $f = 1kHz$ , $A_v = 20dB$ , $R_L = 2k\Omega$ , $V_o = 2V_{pp}$ , $C_L = 100pF$ , $T_{amb} = +25^\circ C$		0.06		%
$e_n$	Equivalent Input Noise Voltage $f = 1kHz$ , $R_s = 100\Omega$		23		$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
$\phi_m$	Phase Margin		50		Degrees





## Misura di $V_{os}$



Op-Amp in configurazione invertente. Le correnti di polarizzazione e di Offset sono cortocircuitate a massa, e non contribuiscono alla tensione in uscita.

La misura della tensione DC all'uscita, con il multimetro fornisce:

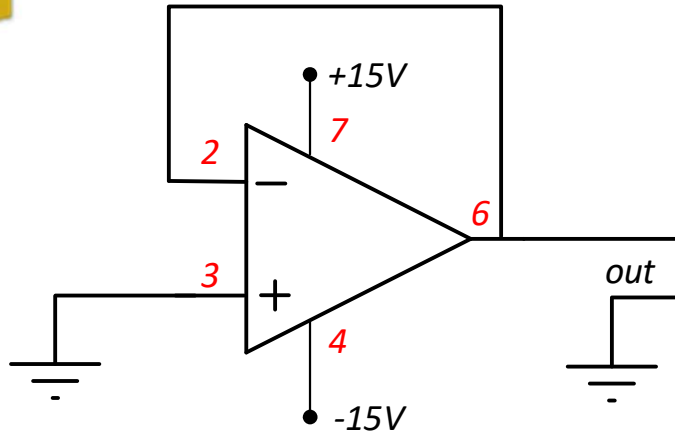
$$V_{out} = V_{os}$$

$V_{os}$  è dell'ordine di qualche mV

Serve un multimetro con risoluzione molto elevata

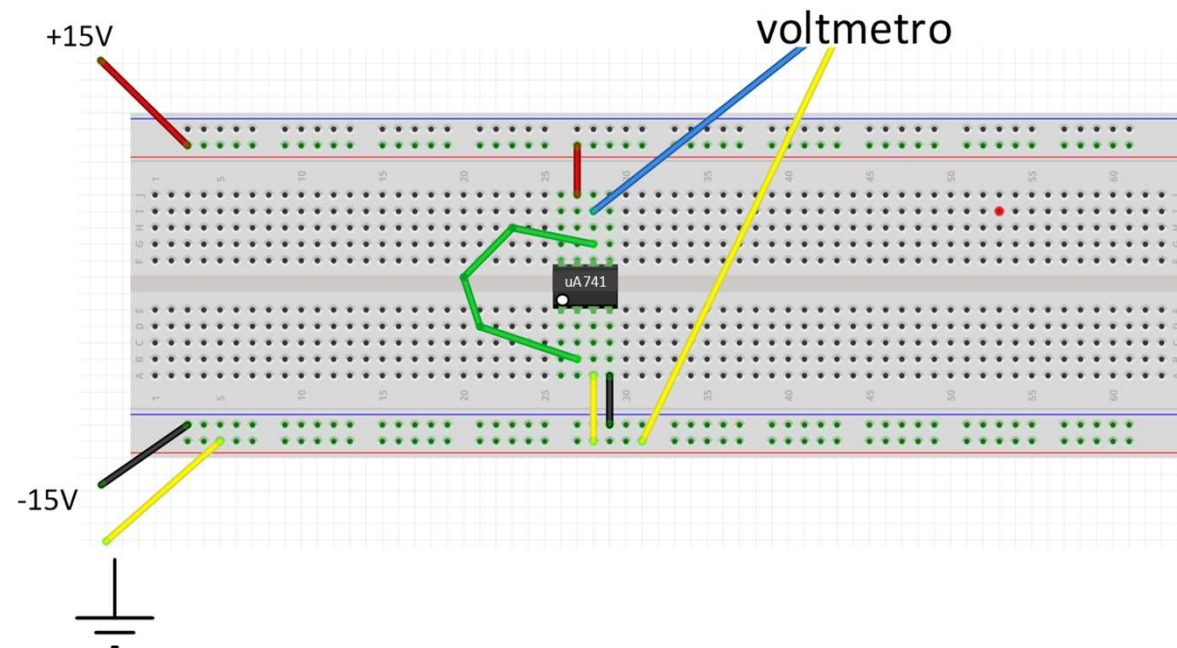


# Montaggio del Circuito



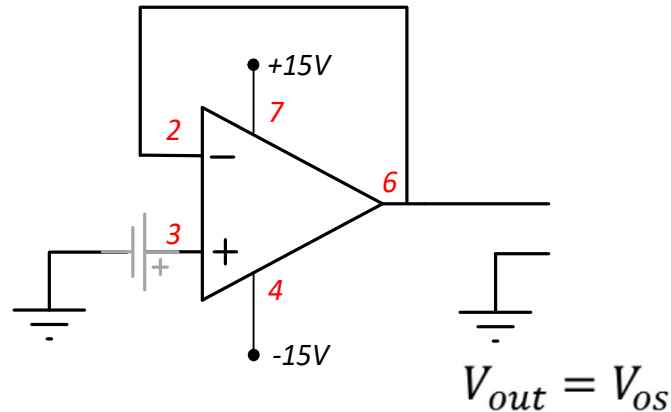
## Attività:

- montare questo semplice circuito
- misurare ed annotare  $V_{os}$  (modulo e segno)

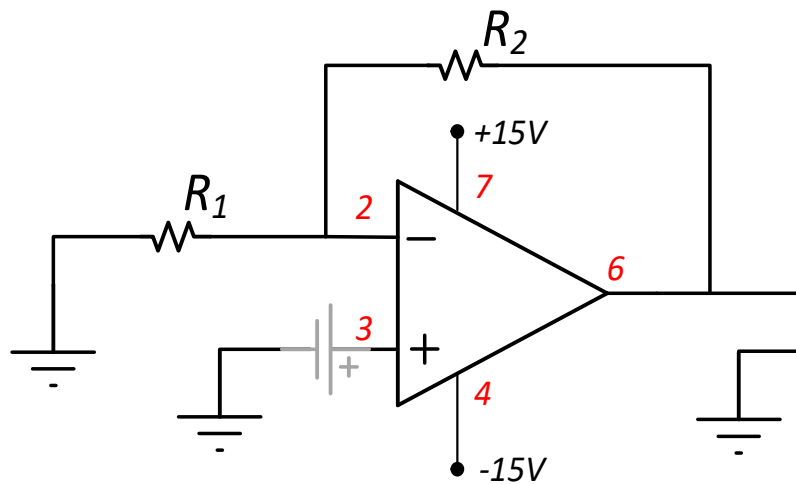




## Circuito alternativo per la misura di $V_{os}$



**La risoluzione del multimetro deve essere sufficientemente alta**  
**La misura risulta inoltre sensibile al rumore**

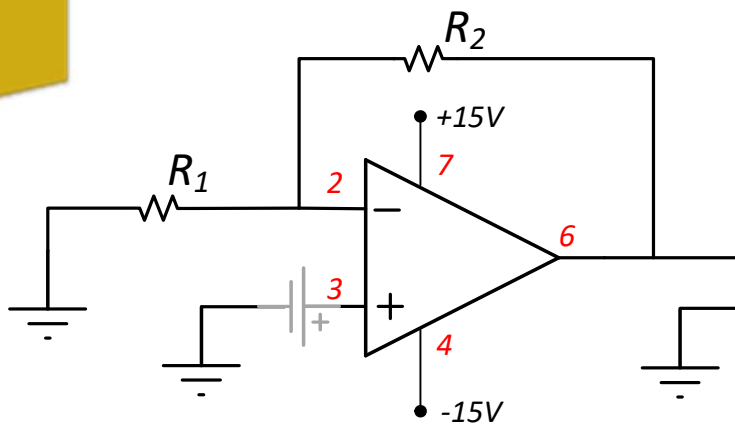


**E' possibile sfruttare il guadagno di tensione per rilassare la risoluzione dello strumento e ridurre l'influenza del rumore**

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{os}$$



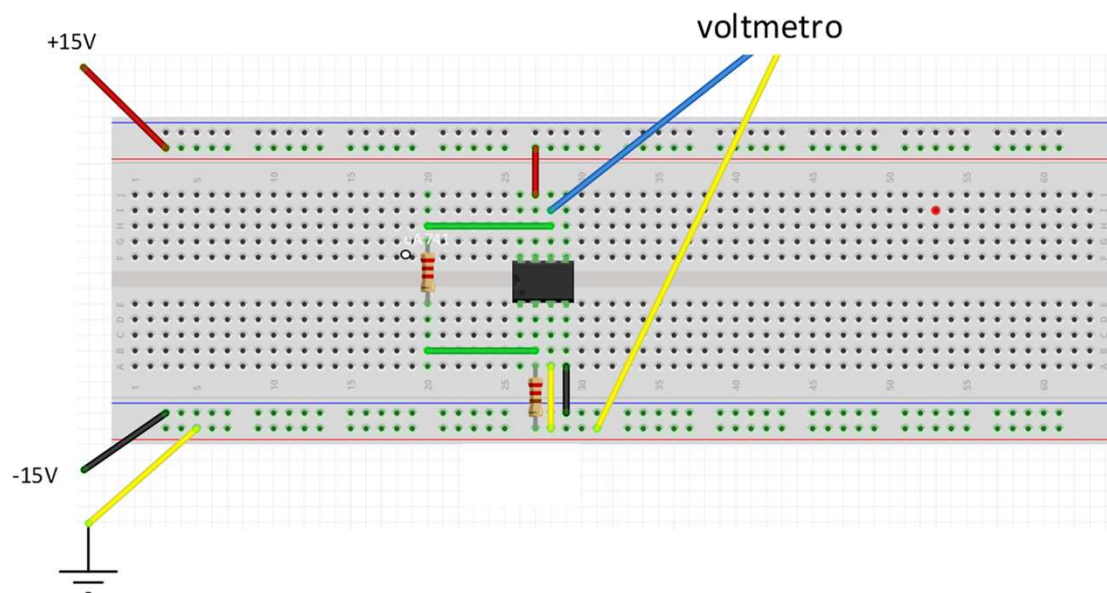
# Montaggio del Circuito



**Attività:** montare questo semplice circuito nei due casi:

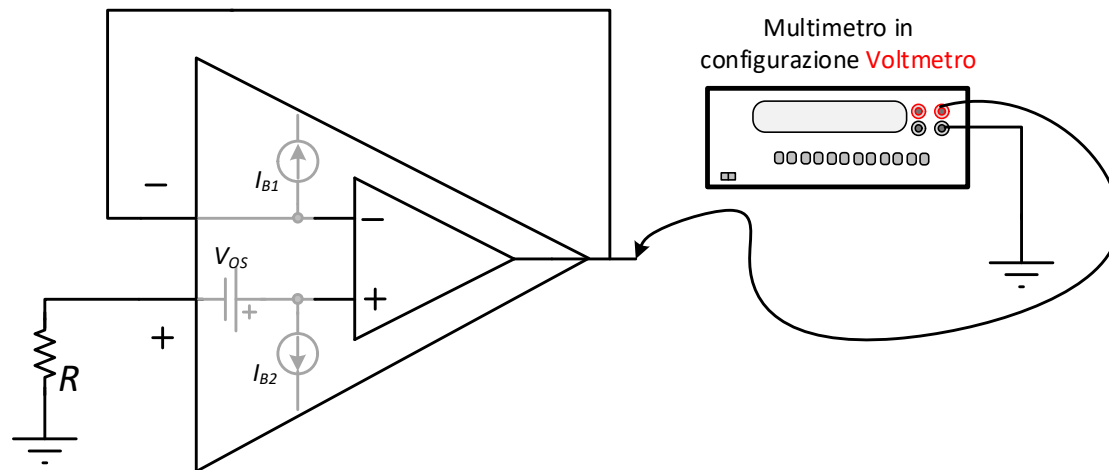
- $R_1=220\Omega$ ,  $R_2=2.2k\Omega$
- $R_1=220k\Omega$ ,  $R_2=2.2M\Omega$

Stimare  $V_{OS}$ , confrontare i risultati ottenuti nei tre casi e giustificare le differenze

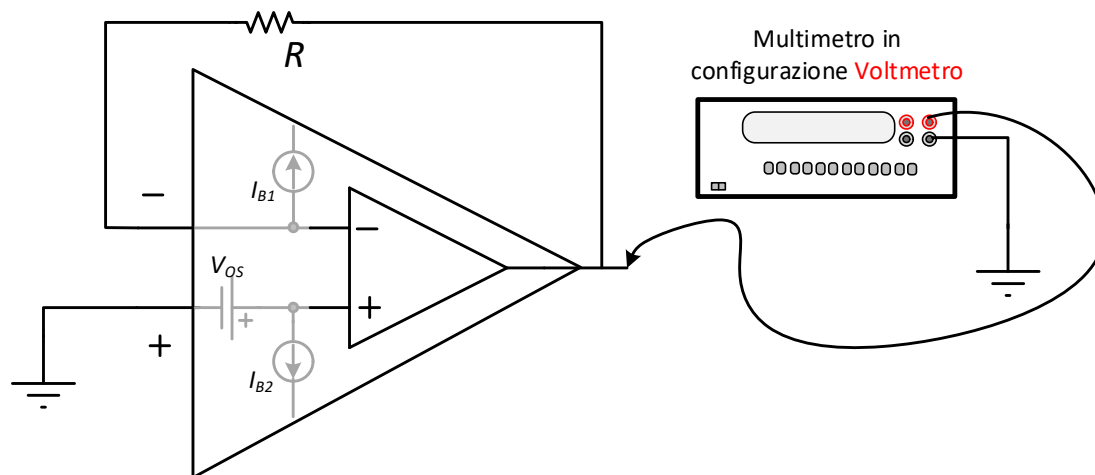




# Misura di $I_{B1}$ , $I_{B2}$



$$V_{out} = V_{os} - I_{B2}R$$



$$V_{out} = V_{os} - I_{B1}R$$



## Misura di $I_{B1}, I_{B2}$

$$V_{out} = V_{os} - I_{B1,2}R$$

Scegliendo opportunamente R è possibile rendere trascurabile l'effetto di  $V_{os}$  sulla misura

Dal datasheet dell'Op-Amp

$$V_{os,max} = 5\text{mV}. I_{B1-2,typ} = 10\text{nA}$$

Possiamo scegliere R in modo che:

$$V_{os,max} < \mathbf{0.1} \times I_{B,typ} R \rightarrow R > 10 V_{os,max} / I_{B1-2,typ} = 5\text{M}\Omega$$

Decidiamo di utilizzare:  $R = 5.6\text{M}\Omega$

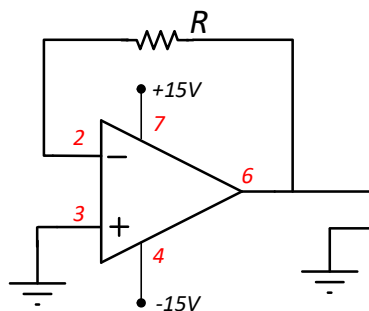


# Montaggio dei Circuiti

## Attività:

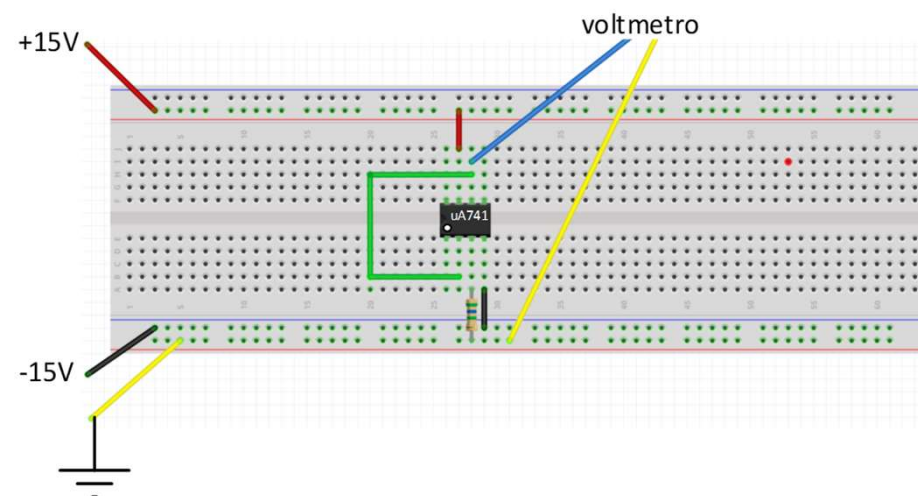
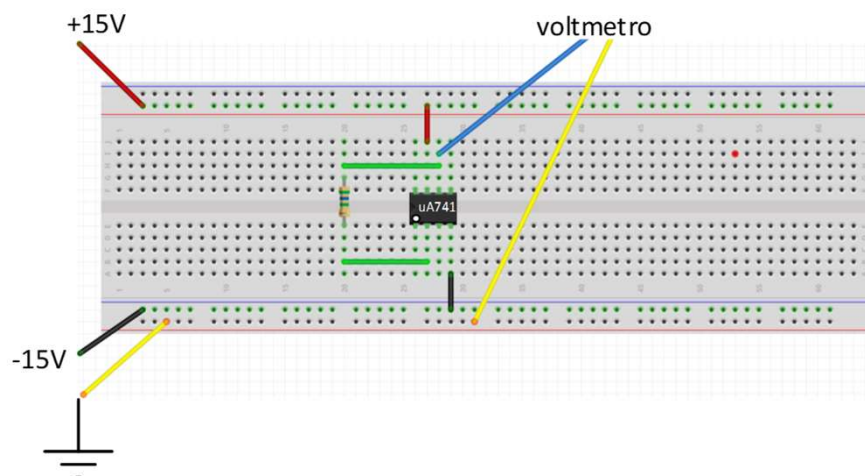
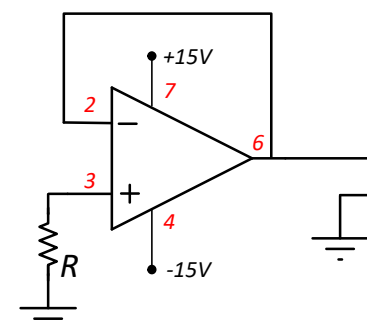
- montare questi semplici circuiti e stimare  $I_{B1}$  ed  $I_{B2}$
- calcolare  $I_B$  ed  $I_{OS}$
- confrontare i risultati ottenuti ( $V_{OS}$ ,  $I_B$ ,  $I_{OS}$ ) con quanto riportato nel datasheet

Misura di  $I_{B1}$



$$R=5.6M\Omega$$

Misura di  $I_{B2}$





Università degli  
Studi di Pavia

## *Intervento Silvia Roncelli:*

*- Spiegazione della strumentazione  
(generatore di funzioni ed oscilloscopio digitale)*





# Slew Rate

In un amplificatore operazionale reale la velocità di variazione della tensione di uscita non può superare un valore limite detto **Slew Rate** (velocità di risposta)

$$S.R. = \left. \frac{dV_o}{dt} \right|_{max}$$

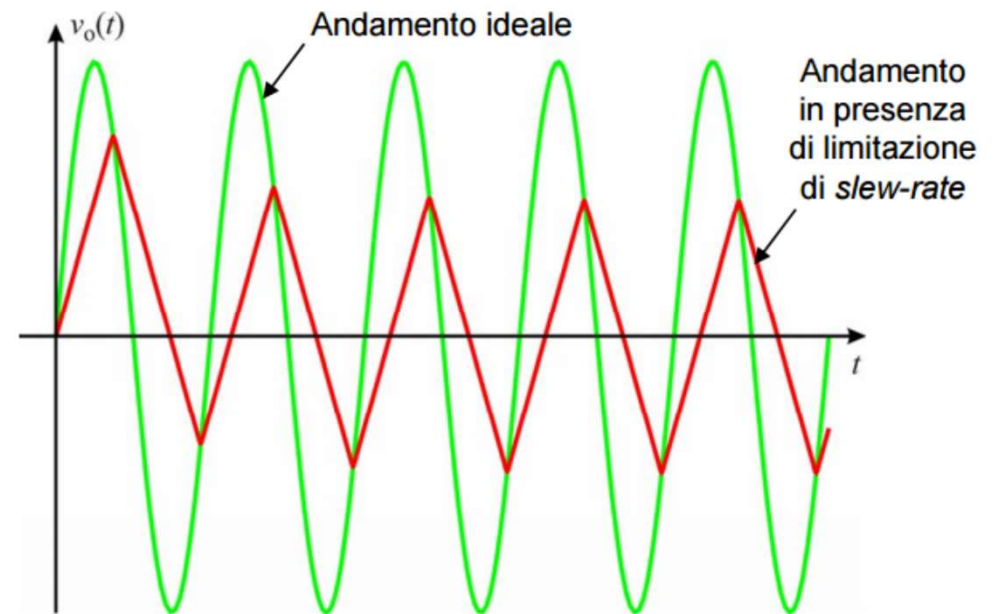
Con segnale sinusoidale, la massima velocità di variazione risulta:

$$V_{out}(t) = V_0 \sin(2\pi f t)$$

$$S.R. = \left. \frac{dV_o}{dt} \right|_{max} = V_0 2\pi f$$

Per evitare distorsione, il prodotto  $V_o \times f$  deve essere inferiore a  $S.R./2\pi$

Es:  $S.R.=0.5V/\mu\text{sec}$ ,  $f=100\text{KHz}$   $\rightarrow V_o < 0.8V$



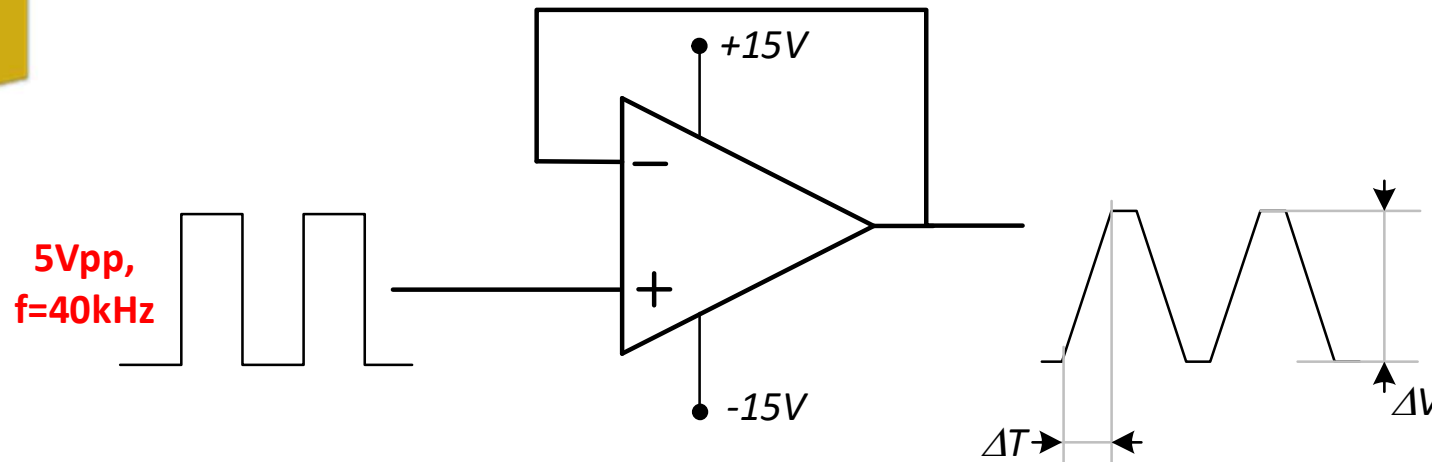


# Amplificatori Operazionali commerciali

Parametro	Ideale	Ingresso a BJT			Ingresso a FET	
		741C	LM301A	LMH6703	TL081/LF351	CA3140
$R_i$	$\infty$	2 M $\Omega$	800 k $\Omega$	1 M $\Omega$	10 <sup>12</sup> $\Omega$	1,5 · 10 <sup>12</sup> $\Omega$
$V_{os}$	0	2 mV	1 mV	7 mV	5 mV	2 mV
$I_{bias}$	0	80 nA	120 nA	7 $\mu$ A	50 pA	10 pA
$I_{os}$	0	20 nA	40 nA	0,5 nA	25 pA	0,5 pA
$V_{in}$	+ $V_{CC}$ - $V_{EE}$	$\pm$ 14 V	$\pm$ 14 V	$\pm$ 3,4 V	$\pm$ 14 V	+13 V -14,4 V
$R_o$	0	75 $\Omega$	-	0,05 $\Omega$	75 $\Omega$	60 $\Omega$
$V_{out}$	+ $V_{CC}$ - $V_{EE}$	$\pm$ 14 V	$\pm$ 14 V	$\pm$ 3,4 V	$\pm$ 13,5 V	+13 V -14,4 V
$I_{sc}$	-	25 mA	-	90 mA	25 mA source 17 mA sink	40 mA source 18 mA sink
$A_{OL}$	$\infty$	2 · 10 <sup>5</sup>	1,6 · 10 <sup>5</sup>	1 ÷ 10	1 · 10 <sup>5</sup>	1 · 10 <sup>5</sup>
SR	$\infty$	0,5 V/ $\mu$ s	0,5 V/ $\mu$ s	4200 V/ $\mu$ s	13 V/ $\mu$ s	7 V/ $\mu$ s
GBP = $f_T$	$\infty$	1 MHz	1 MHz	1,2 GHz	4 MHz	1 MHz
CMRR	$\infty$	90 dB	90 dB	47 dB	100 dB	90 dB

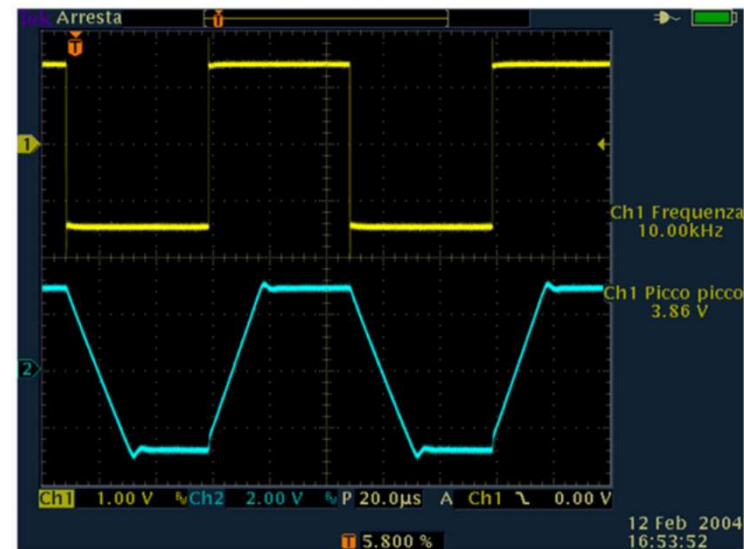


# Misura dello Slew Rate



Applicare un'onda quadra all'ingresso.  
Osservare i segnali nel dominio del tempo con l'oscilloscopio. L'uscita presenta fronti di salita/discesa limitati dallo Slew Rate

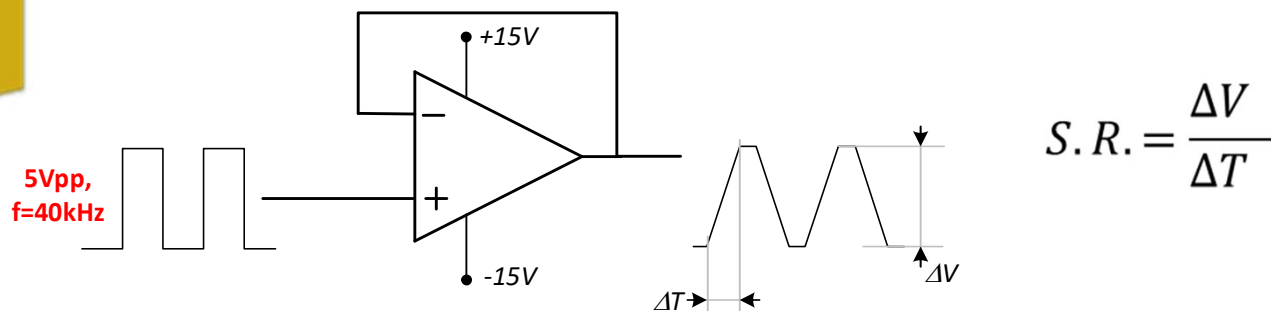
$$S.R. = \frac{\Delta V}{\Delta T}$$





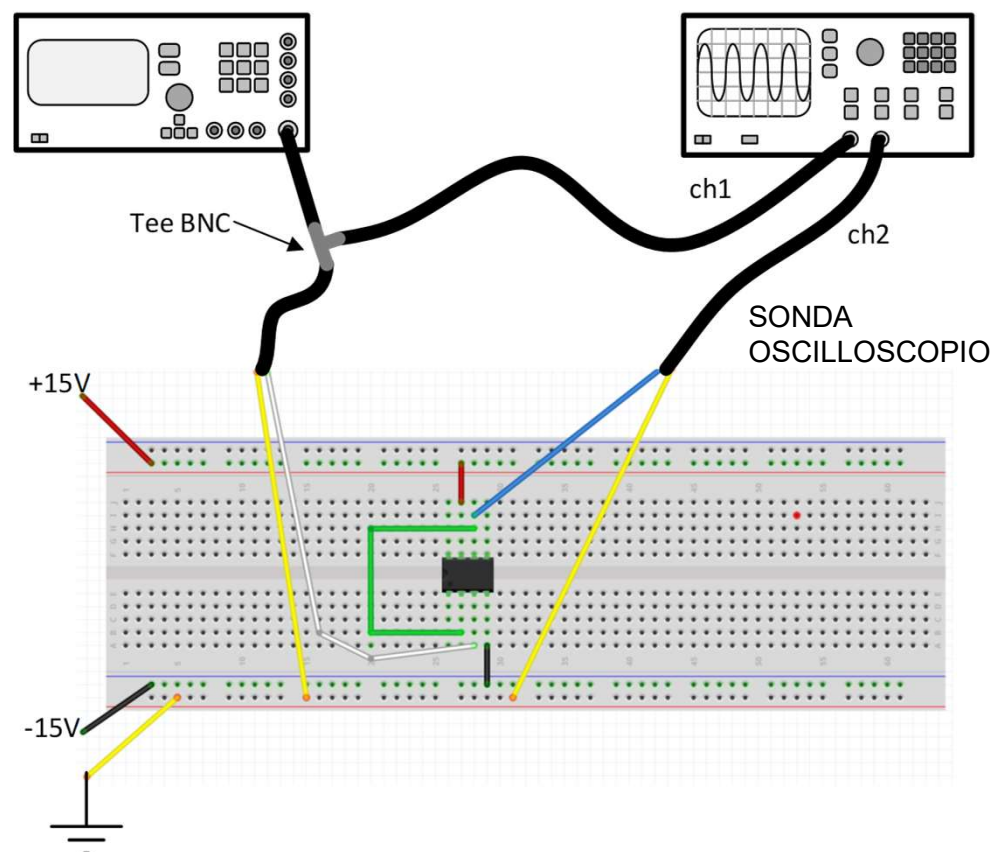
Università degli  
Studi di Pavia

# Setup di Misura dello Slew Rate



## Attività:

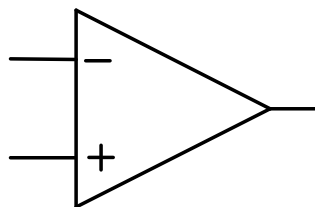
- Montare questo semplice circuito e stimare lo S.R. applicando all'ingresso un'onda quadra. Iniziare con  $V_{pp}=5V$ ,  $f=40kHz$
- Confrontare lo S.R. sul fronte di salita e sul fronte di discesa. In generale possono essere diversi
- Ripetere la misura cambiando la frequenza e l'ampiezza in ingresso. Lo S.R. dovrebbe essere all'incirca costante
- Confrontare i risultati con quanto riportato nel datasheet



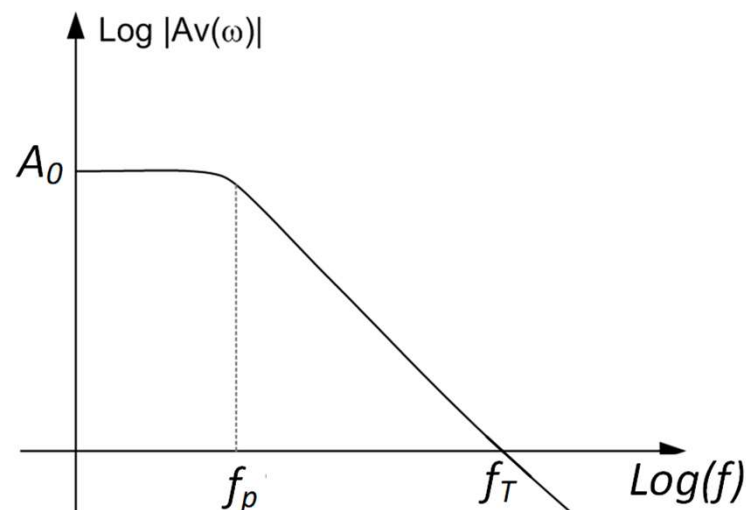


## Prodotto Banda-Guadagno

La risposta in frequenza dell'Op-Amp è in buona approssimazione descritta da una funzione di trasferimento a singolo polo:



$$A_d(f) = \frac{V_{out}}{V_{i,diff}} = \frac{V_{out}}{(V_+ - V_-)} = \frac{A_0}{1 + j \frac{f}{f_p}}$$



Il prodotto banda-guadagno  $GBP = A_0 \times f_p$  è una figura di merito molto importante e rappresenta la frequenza alla quale il modulo del guadagno diventa unitario (attraversamento dell'asse orizzontale a 0dB)

$$A_d(f \gg f_p) \approx \frac{A_0}{j \frac{f}{f_p}}$$

$$|A_d(f = A_0 f_p)| \approx 1$$

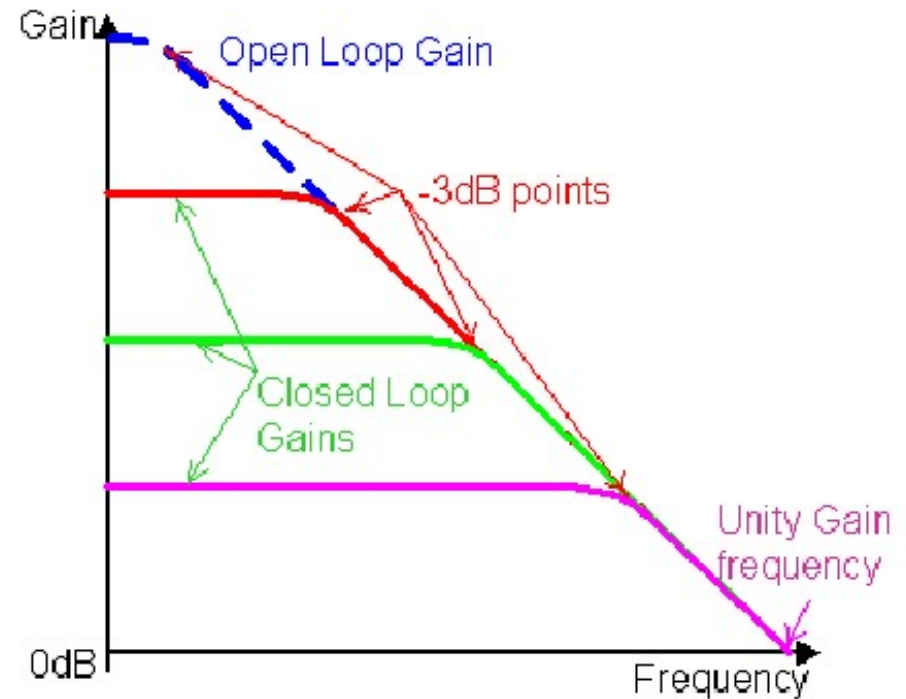
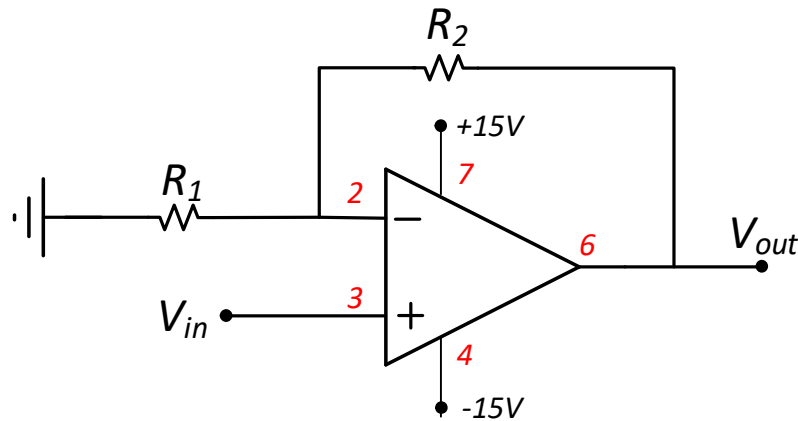
Per questa ragione, GBP viene anche denominato Unity-Gain Frequency ( $f_T$ )



Università degli  
Studi di Pavia

# Prodotto Banda-Guadagno

La Unity-Gain Frequency non cambia quando l'Op-Amp viene utilizzato in anello chiuso



La retroazione permette di scambiare banda e guadagno mantenendo costante il prodotto



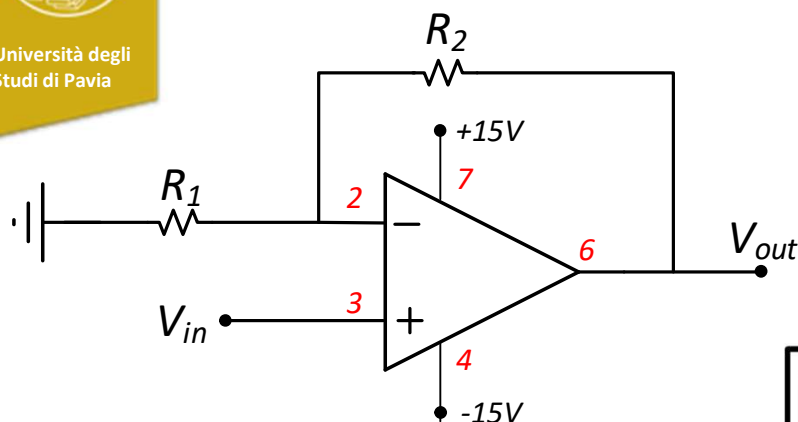
# Amplificatori Operazionali commerciali

Parametro	Ideale	Ingresso a BJT			Ingresso a FET	
		741C	LM301A	LMH6703	TL081/LF351	CA3140
$R_i$	$\infty$	2 M $\Omega$	800 k $\Omega$	1 M $\Omega$	10 <sup>12</sup> $\Omega$	1,5 · 10 <sup>12</sup> $\Omega$
$V_{os}$	0	2 mV	1 mV	7 mV	5 mV	2 mV
$I_{bias}$	0	80 nA	120 nA	7 $\mu$ A	50 pA	10 pA
$I_{os}$	0	20 nA	40 nA	0,5 nA	25 pA	0,5 pA
$V_{in}$	+ $V_{CC}$ - $V_{EE}$	$\pm$ 14 V	$\pm$ 14 V	$\pm$ 3,4 V	$\pm$ 14 V	+13 V -14,4 V
$R_o$	0	75 $\Omega$	-	0,05 $\Omega$	75 $\Omega$	60 $\Omega$
$V_{out}$	+ $V_{CC}$ - $V_{EE}$	$\pm$ 14 V	$\pm$ 14 V	$\pm$ 3,4 V	$\pm$ 13,5 V	+13 V -14,4 V
$I_{sc}$	-	25 mA	-	90 mA	25 mA source 17 mA sink	40 mA source 18 mA sink
$A_{OL}$	$\infty$	2 · 10 <sup>5</sup>	1,6 · 10 <sup>5</sup>	1 ÷ 10	1 · 10 <sup>5</sup>	1 · 10 <sup>5</sup>
SR	$\infty$	0,5 V/ $\mu$ s	0,5 V/ $\mu$ s	4200 V/ $\mu$ s	13 V/ $\mu$ s	7 V/ $\mu$ s
GBP = $f_T$	$\infty$	1 MHz	1 MHz	1,2 GHz	4 MHz	1 MHz
CMRR	$\infty$	90 dB	90 dB	47 dB	100 dB	90 dB



Università degli  
Studi di Pavia

# Circuito per la misura di GBP

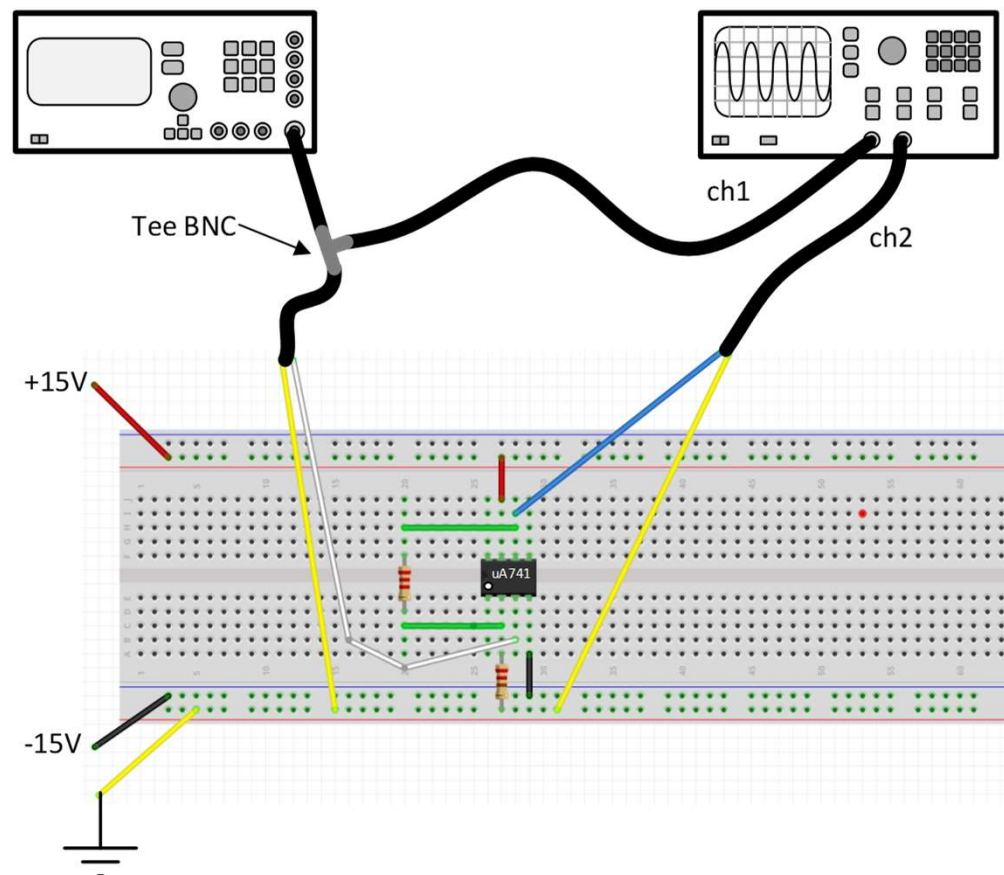


$$R1=220 \Omega$$

$$R2=2.2k\Omega$$

## Attività:

- Montare questo semplice circuito e rilevare per punti la funzione di trasferimento (cambiando la frequenza del segnale di ingresso)
- Stimare il guadagno, la banda e GBP
- Ripetere sostituendo R2 con 22k $\Omega$  e verificare che GBP non cambia
- Confrontare i risultati con quanto riportato nel datasheet







## Note

**Attenzione ad evitare distorsione da Slew Rate. Assumendo di voler variare la frequenza fino ad 1MHz, l'ampiezza massima (0-pk) in uscita deve essere minore di:**

$$V_{o\_max} < \frac{S.R.}{2\pi \ 1MHz}$$

**Esempio: se S.R. = 0.5V/uSec,  $V_{o,max}$  = 80mV. ( $V_{o,pp}$  = 160mV)**